

# Case Dynamica 2014

Pieter Van Damme

Wouter Van Gansbeke

Lennert Vanmunster

Ruben Verhulst

27 november 2014

## 1 Transformatiematrices

### 1.1 Van het $x'y'z'$ -assenstelsel naar het $xyz$ -assenstelsel

Het  $x'y'z'$  assenstelsel wordt bekomen door het  $xyz$ -assenstelsel te roteren met een hoek  $\alpha$  rond de x-as. De omgekeerde transformatie draait dus met een negatieve hoek  $\alpha$  rond de x-as. Het  $x''y''z''$ -assenstelsel heeft dezelfde oriëntatie als het  $x'y'z'$ -assenstelsel. Hun transformatiematrices zijn daarom hetzelfde.

$$R^{x'y'z' \rightarrow xyz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

### 1.2 Van het $x'''y'''z'''$ -assenstelsel naar het $x''y''z''$ -assenstelsel

Het  $x'''y'''z'''$ -assenstelsel wordt bekomen door het  $x''y''z''$ -assenstelsel te roteren met een hoek  $\beta$  rond de  $y''$ -as. De transformatiematrix draait dus met een negatieve hoek  $\beta$  rond de  $y'''$ -as.

$$R^{x'''y'''z''' \rightarrow x''y''z''} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

Voor de omgekeerde transformatie wordt deze matrix geïnverteerd.

$$R^{x''y''z'' \rightarrow x'''y'''z'''} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & -\sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix}$$

### 1.3 Van het $x'''y'''z'''$ -assenstelsel naar het $xyz$ -assenstelsel

Om van het  $x'''y'''z'''$ -assenstelsel naar het  $xyz$ -assenstelsel te gaan, worden de vorige twee berekende transformatiematrices met elkaar vermenigvuldigd. Eerst worden de  $x'''y'''z'''$ -coördinaten getransformeerd naar het  $x''y''z''$ -assenstelsel. Vervolgens worden ze omgezet naar het  $xyz$ -

assenstelsel.

$$\begin{aligned}
R^{x'''y'''z''' \rightarrow xyz} &= R^{x'''y'''z''' \rightarrow x''y''z''} R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \cos(\beta) \\ -\cos(\alpha) \sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

## 2 Kinematica

### 2.1 Vraag 1

#### 2.1.1 Ogenblikkelijke totale rotatiesnelheidsvector

Om de ogenblikkelijke totale rotatiesnelheidsvector  $\vec{\omega}_w$  te bepalen worden de drie afzonderlijke rotatiesnelheidsvectoren uitgedrukt in het wereldassenstelsel en vervolgens opgeteld.

$$\vec{\omega}_{tot} = \vec{\omega}_g + \vec{\omega}_i + \vec{\omega}_w$$

Deze termen worden nu afzonderlijk bepaald.

$$\vec{\omega}_g = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \vec{\omega}_g' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \omega_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin \alpha \omega_g \\ \cos(\alpha) \omega_g \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_i = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \vec{\omega}_i' = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos \alpha \omega_i \\ \sin(\alpha) \omega_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
\vec{\omega}_w &= R^{x'''y'''z''' \rightarrow xyz} \vec{\omega}_w''' = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ \sin(\alpha) \sin(\beta) & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \cos(\beta) \\ -\cos(\alpha) \sin(\beta) & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \cos(\beta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} -\cos(\beta) \omega_w \\ -\sin(\alpha) \sin(\beta) \omega_w \\ \cos(\alpha) \sin(\beta) \omega_w \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

De ogenblikkelijke rotatievector wordt dus weergegeven door de volgende vergelijking.

$$\vec{\omega}_{tot} = \begin{bmatrix} -\cos(\beta) \omega_w \\ \cos(\alpha) \omega_i - \sin(\alpha)(\omega_g + \sin \beta \omega_w) \\ \sin(\alpha) \omega_i + \cos(\alpha)(\omega_g + \sin \beta \omega_w) \end{bmatrix}$$

#### 2.1.2 Ogenblikkelijke totale rotatieversnellingsvector

De totale rotatieversnellingsvector is de afgeleide van de rotatiesnelheidsvector naar de tijd. Hierbij moeten er termen geïntroduceerd worden die de rotatie van de snelheidsvectoren weergeven.

$$\vec{\alpha}_{tot} = \frac{d\vec{\omega}_{tot}}{dt} = \vec{\alpha}_g + \vec{\alpha}_w + \vec{\alpha}_i + \vec{\omega}_g \times \vec{\omega}_i + \vec{\omega}_g \times \vec{\omega}_w + \vec{\omega}_i \times \vec{\omega}_w$$

Al deze termen worden nu afzonderlijk bepaald.

$$\vec{\alpha}_g = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \alpha_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\alpha)\alpha_g \\ \cos(\alpha)\alpha_g \end{bmatrix}$$

$$\vec{\alpha}_i = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_i \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\alpha)\alpha_i \\ \sin(\alpha)\alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\vec{\alpha}_w = R^{x'''y'''z''' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} \alpha_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta)\alpha_w \\ \sin(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w \\ -\cos(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_g \times \vec{\omega}_i = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_i\omega_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_g \times \vec{\omega}_w = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ \omega_{wx} & \omega_{wy} & \omega_{wz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w \\ -\sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_i \times \vec{\omega}_w = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ \omega_{wx} & \omega_{wy} & \omega_{wz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \sin(\beta)\omega_i\omega_w \\ -\sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_i\omega_w \\ \cos(\beta)\cos(\beta)\omega_i\omega_w \end{bmatrix}$$

De totale ogenblikkelijke rotatieversnellingsvector wordt dus door de volgende formule gegeven.

$$\begin{aligned} \vec{\alpha}_{tot} &= \frac{d\vec{\omega}_{tot}}{dt} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\beta)\alpha_w - \omega_g\omega_i + \sin(\beta)\omega_i\omega_w \\ -\sin(\alpha)\alpha_g + \cos(\alpha)\alpha_i + \sin(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w - \cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w - \sin(\alpha)\sin(\beta)\omega_i\omega_w \\ \cos(\alpha)\alpha_g + \sin(\alpha)\alpha_i - \cos(\alpha)\sin(\beta)\alpha_w - \sin(\alpha)\cos(\beta)\omega_g\omega_w + \cos(\alpha)\cos(\beta)\omega_i\omega_w \end{bmatrix} \end{aligned}$$

## 2.2 Vraag 2

### 2.2.1 De ogenblikkelijke snelheid

De snelheid van C kan beschouwd worden als de som van de relatieve snelheid van het punt C in het  $x'y'z'$ -assenstelsel en de snelheid van dat assenstelsel. In dit assenstelsel kan de beweging van C beschouwd worden als een som van rotaties, nl. een rotatie rond het punt A door  $\vec{\omega}_g$  en een rotatie rond het punt B door  $\vec{\omega}_i$

$$\vec{v}_C = \vec{v}_A + \vec{\omega}_g \times (\vec{r}_C - \vec{r}_A) + \vec{\omega}_i \times (\vec{r}_C - \vec{r}_B)$$

Deze termen worden afzonderlijk bepaald.

$$\vec{v}_A = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ v_v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ v_v \cos(\alpha) \\ v_v \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_C - \vec{r}_A = \begin{bmatrix} r_{CAx} \\ r_{CAy} \\ r_{CAz} \end{bmatrix} = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} l_1 - l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ 0 \\ l_2 - l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 - l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ -\sin(\alpha)(l_2 - l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha)(l_2 - l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_g \times (\vec{r}_C - \vec{r}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ r_{CAx} & r_{CAy} & r_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) \\ -\omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) \end{bmatrix}$$

$$\vec{r}_C - \vec{r}_B = \begin{bmatrix} r_{CBx} \\ r_{CBy} \\ r_{CBz} \end{bmatrix} = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} -l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ 0 \\ -l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) \\ -\sin(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_i \times (\vec{r}_C - \vec{r}_B) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ r_{CBx} & r_{CBy} & r_{CBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ -\omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

De totale snelheid wordt dus gegeven door de volgende gelijkheid.

$$\vec{v}_C = \begin{bmatrix} \omega_i(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha)v_v - \omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) - \omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \sin(\alpha)v_v - \omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

## 2.2.2 De ogenblikkelijke versnelling

De ogenblikkelijke versnelling is de afgeleide van de ogenblikkelijke snelheid. Hierbij moet er zeker rekening gehouden worden met het afzonderlijk afleiden van de leden van de kruisproducten.

$$\vec{a}_C = \frac{d\vec{v}_C}{dt} = \vec{a}_A + \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} \times (\vec{r}_C - \vec{r}_A) + \vec{\omega}_g \times (\vec{v}_C - \vec{v}_A) + \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} \times (\vec{r}_C - \vec{r}_B) + \vec{\omega}_i \times (\vec{v}_C - \vec{v}_B)$$

Al deze termen worden opnieuw apart berekend.

$$\vec{a}_A = R^{x'y'z' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} 0 \\ a_v \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a_v \cos(\alpha) \\ a_v \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\vec{\omega}_g}{dt} = \alpha_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -\sin(\alpha)\alpha_g \\ \cos(\alpha)\alpha_g \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\vec{\omega}_g}{dt} \times (\vec{r}_C - \vec{r}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} x & \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} y & \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} z \\ r_{CAx} & r_{CAy} & r_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \cos(\alpha)\alpha_g(-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) \\ \sin(\alpha)\alpha_g(-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_C - \vec{v}_A &= \begin{bmatrix} v_{CAx} \\ v_{CAy} \\ v_{CAz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \omega_i(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ -\omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) - \omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ -\omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\vec{\omega}_g \times (\vec{v}_C - \vec{v}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ v_{CAx} & v_{CAy} & v_{CAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_g^2(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) \\ \omega_g \omega_i \cos(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \omega_g \omega_i \sin(\alpha)(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\vec{\omega}_i}{dt} = \vec{\alpha}_i + \vec{\omega}_g \times \vec{\omega}_i = \begin{bmatrix} -\omega_g \omega_i \\ \cos(\alpha)\alpha_i \\ \sin(\alpha)\alpha_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} \times (\vec{r}_C - \vec{r}_B) &= \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} x & \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} y & \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} z \\ r_{CBx} & r_{CBy} & r_{CBz} \end{vmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \alpha_i(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots - \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \alpha_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \alpha_i \\ \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \alpha_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \alpha_i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\vec{v}_B = \vec{v}_A + \vec{\omega}_g \times (\vec{r}_B - \vec{r}_A) = \begin{bmatrix} -\sin(\alpha)\omega_g l_2 \\ \cos(\alpha)v_v - \cos(\alpha)\omega_g l_1 \\ \sin(\alpha)v_v - \sin(\alpha)\omega_g l_1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{v}_C - \vec{v}_B = \begin{bmatrix} \omega_i(-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) + \sin(\alpha)\omega_g l_2 \\ -\omega_g \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) - \omega_i \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) + \cos(\alpha)\omega_g l_1 \\ -\omega_g \sin(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \omega_i \cos(\alpha)(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) + \sin(\alpha)\omega_g l_1 \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_i \times (\vec{v}_C - \vec{v}_B) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ v_{CBx} & v_{CBy} & v_{CBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_i^2(l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ -\omega_i \sin(\alpha)(\cos(\beta) l_3 \omega_i - \sin(\beta) l_4 \omega_i - \sin(\alpha)\omega_g l_2) \\ \omega_i \cos(\alpha)(\cos(\beta) l_3 \omega_i - \sin(\beta) l_4 \omega_i - \sin(\alpha)\omega_g l_2) \end{bmatrix}$$

Dit wordt nu allemaal opgeteld.

$$\vec{a}_C = \begin{bmatrix} \omega_g^2 (l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - l_1) + \alpha_i (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \cdots \\ \cdots + \omega_i^2 (l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ a_v \cos(\alpha) + \cos(\alpha) \alpha_g (-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) + \omega_g \omega_i \cos(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i - \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \alpha_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \alpha_i \cdots \\ \cdots - \omega_i \sin(\alpha) (\cos(\beta) l_3 \omega_i - \sin(\beta) l_4 \omega_i - \sin(\alpha) \omega_g l_2) \\ a_v \sin(\alpha) + \sin(\alpha) \alpha_g (-l_3 \sin(\beta) - l_4 \cos(\beta) + l_1) + \omega_g \omega_i \sin(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \cdots \\ \cdots + \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i + \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \alpha_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \alpha_i \cdots \\ \cdots + \omega_i \cos(\alpha) (\cos(\beta) l_3 \omega_i - \sin(\beta) l_4 \omega_i - \sin(\alpha) \omega_g l_2) \end{bmatrix}$$

## 2.3 Vraag 3

Om de bijdrage van de coriolisversnelling te bepalen kan de volgende formule gebruikt worden.

$$\vec{a}_{coriolis} = -2(\vec{\omega} \times \vec{v}_{rel})$$

Om de versnelling van het voorwerp te beschrijven, wordt  $\omega$  gelijkgesteld aan  $\omega_i$ . De relatieve snelheid in dit assenstelsel is de rotatiesnelheid van C rond B.

$$\vec{\omega} = \vec{\omega}_i$$

$$\vec{v}_{rel} = \vec{\omega}_i \times (\vec{r}_C - \vec{r}_B) = \begin{bmatrix} -\omega_i (l_3 \cos(\beta) - l_4 \sin(\beta)) \\ -\omega_i \sin(\alpha) (l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \omega_i \cos(\alpha) (l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\vec{a}_{coriolis} = \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \cos(\alpha) \omega_g \omega_i (l_3 \cos(\beta) - l_4 \sin(\beta)) \\ 2 \sin(\alpha) \omega_g \omega_i (l_3 \cos(\beta) - l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix}$$

## 2.4 Vraag 4

### 2.4.1 Ogenblikkelijke snelheid

Voor het berekenen van de snelheid van D wordt een gelijkaardige methode gebruikt als voor de snelheid van C. Aangezien D zich niet op het wiel bevindt, heeft de rotatie van het wiel nog steeds geen invloed op de snelheid.

$$\vec{v}_D = \vec{v}_A + \vec{\omega}_g \times (\vec{r}_D - \vec{r}_A) + \vec{\omega}_i \times (\vec{r}_D - \vec{r}_B)$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_D - \vec{r}_A &= (\vec{r}_D - \vec{r}_C) + (\vec{r}_C - \vec{r}_A) \\ &= R^{x'''y'''z''' \rightarrow xyz} \begin{bmatrix} \frac{3}{4}l_4 \\ 0 \\ \frac{1}{4}l_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} r_{CAx} \\ r_{CAy} \\ r_{CAz} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -1/4 l_4 \cos(\beta) - 3/4 l_3 \sin(\beta) + l_1 \\ 3/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 - 1/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 - \sin(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta) + l_2) \\ -3/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 + 1/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 + \cos(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta) + l_2) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\vec{\omega}_g \times (\vec{r}_D - \vec{r}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ v_{DAx} & v_{DAy} & v_{DAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/4 \omega_g \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \\ -1/4 \omega_g \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \vec{r}_D - \vec{r}_B &= (\vec{r}_D - \vec{r}_C) + (\vec{r}_C - \vec{r}_B) \\ &= \begin{bmatrix} -1/4 l_4 \cos(\beta) - 3/4 l_3 \sin(\beta) \\ 3/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 - 1/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 - \sin(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ -3/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 + 1/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 + \cos(\alpha) (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\vec{\omega}_i \times (\vec{r}_D - \vec{r}_B) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ v_{DBx} & v_{DBy} & v_{DBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} -1/4 \omega_i (3 l_3 \cos(\beta) - l_4 \sin(\beta)) \\ 1/4 \omega_i \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ 1/4 \omega_i \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

De totale snelheid van D wordt dus door de volgende gelijkheid gegeven.

$$\vec{v}_D = \begin{bmatrix} -1/4 \omega_i (3 l_3 \cos(\beta) - l_4 \sin(\beta)) \\ \cos(\alpha) v_v - 1/4 \omega_g \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) - 1/4 \omega_i \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ \sin(\alpha) v_v - 1/4 \omega_g \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) + 1/4 \omega_i \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

#### 2.4.2 Ogenblikkelijke versnelling

Ook voor de ogenblikkelijke versnelling van D wordt een gelijkaardige methode gebruikt als voor C.

$$\vec{a}_D = \frac{d\vec{v}_D}{dt} = \vec{a}_A + \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} \times (\vec{r}_D - \vec{r}_A) + \vec{\omega}_g \times (\vec{v}_D - \vec{v}_A) + \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} \times (\vec{r}_D - \vec{r}_B) + \vec{\omega}_i \times (\vec{v}_D - \vec{v}_B)$$

Opnieuw worden al deze termen afzonderlijk uitgerekend.

$$\vec{a}_A = \begin{bmatrix} 0 \\ a_v \cos(\alpha) \\ a_v \sin(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\frac{d\vec{\omega}_g}{dt} \times (\vec{r}_D - \vec{r}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} x & \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} y & \frac{d\vec{\omega}_g}{dt} z \\ r_{DAx} & r_{DAy} & r_{DAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ -1/4 \alpha_g \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \\ -1/4 \alpha_g \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \end{bmatrix}$$

$$\vec{\omega}_g \times (\vec{v}_D - \vec{v}_A) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{gx} & \omega_{gy} & \omega_{gz} \\ v_{DAx} & v_{DAy} & v_{DAz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 \omega_g^2 (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \\ 1/4 \cos(\alpha) \omega_g \omega_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) \\ 1/4 \sin(\alpha) \omega_g \omega_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} \times (\vec{r}_D - \vec{r}_B) &= \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} x & \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} y & \frac{d\vec{\omega}_i}{dt} z \\ r_{DBx} & r_{DBy} & r_{DBz} \end{vmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 1/4 \alpha_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) \\ 1/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - 3/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots - 3/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \alpha_i - 1/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \alpha_i \\ 1/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - 3/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots + 3/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \alpha_i + 1/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \alpha_i \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\vec{\omega}_i \times (\vec{v}_D - \vec{v}_B) = \begin{vmatrix} \vec{e}_x & \vec{e}_y & \vec{e}_z \\ \omega_{ix} & \omega_{iy} & \omega_{iz} \\ v_{DBx} & v_{DBy} & v_{DBz} \end{vmatrix} = \begin{bmatrix} 1/4 \omega_i^2 (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ 1/4 \omega_i \sin(\alpha) (\sin(\beta) l_4 \omega_i - 3 \cos(\beta) l_3 \omega_i + 4 \sin(\alpha) \omega_g l_2) \\ -1/4 \omega_i \cos(\alpha) (\sin(\beta) l_4 \omega_i - 3 \cos(\beta) l_3 \omega_i + 4 \sin(\alpha) \omega_g l_2) \end{bmatrix}$$

Dit wordt allemaal opgeteld.

$$\vec{a}_D = \begin{bmatrix} 1/4 \omega_g^2 (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) + 1/4 \alpha_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) \cdots \\ \cdots + 1/4 \omega_i^2 (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta)) \\ a_v \cos(\alpha) - 1/4 \alpha_g \cos(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \cdots \\ \cdots + 1/4 \cos(\alpha) \omega_g \omega_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) + 1/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots - 3/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i - 3/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \alpha_i \cdots \\ \cdots - 1/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \alpha_i + 1/4 \omega_i \sin(\alpha) (\sin(\beta) l_4 \omega_i - 3 \cos(\beta) l_3 \omega_i + 4 \sin(\alpha) \omega_g l_2) \\ a_v \sin(\alpha) - 1/4 \alpha_g \sin(\alpha) (3 l_3 \sin(\beta) + l_4 \cos(\beta) - 4 l_1) \cdots \\ \cdots + 1/4 \sin(\alpha) \omega_g \omega_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) + 1/4 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i \cdots \\ \cdots - 3/4 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i + 3/4 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \alpha_i \cdots \\ + 1/4 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \alpha_i - 1/4 \omega_i \cos(\alpha) (\sin(\beta) l_4 \omega_i - 3 \cos(\beta) l_3 \omega_i + 4 \sin(\alpha) \omega_g l_2) \end{bmatrix}$$



### 3 Dynamica

#### 3.1 Vraag 1

##### 3.1.1 Ogenblikkelijke impulsvector landingsgestel

$$\vec{p}_l = m_l \vec{v}_D = \begin{bmatrix} 1/4 m_l \omega_i (l_4 \sin(\beta) - 3 l_3 \cos(\beta)) \\ -1/4 m_l (3 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i + 3 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g + \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g) \\ -1/4 m_l (3 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g - 3 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_i + \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g - \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_i) \end{bmatrix}$$

##### 3.1.2 Verandering impulsvector landingsgestel

$$\frac{d\vec{p}_l}{dt} = m_l \vec{a}_D = \begin{bmatrix} 1/4 m_l (3 \sin(\beta) \omega_i^2 - 2 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i + 3 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i^2 + 6 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i) \\ -1/4 m_l (-\sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_i^2 - 2 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i + 3 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i^2 + 6 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i) \\ -1/4 m_l (-2 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i + \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_i^2 + 6 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i - 2 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_i^2) \end{bmatrix}$$

##### 3.1.3 Ogenblikkelijke impulsvector wiel

$$\vec{p}_w = m_w \vec{v}_C = \begin{bmatrix} m_w \omega_i (-l_3 \cos(\beta) + l_4 \sin(\beta)) \\ m_w (-\sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i - \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_i - \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g) \\ m_w (-\sin(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g + \sin(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g + \cos(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_i) \end{bmatrix}$$

##### 3.1.4 Verandering impulsvector wiel

$$\frac{d\vec{p}_w}{dt} = m_w \vec{a}_C = \begin{bmatrix} m_w (\sin(\beta) l_3 \omega_g^2 - 2 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i + \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i^2 - 2 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i) \\ m_w (\sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_i^2 + 2 \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_i^2 - 2 \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i) \\ m_w (2 \sin(\beta) \sin(\alpha) l_4 \omega_g \omega_i - \sin(\beta) \cos(\alpha) l_4 \omega_i^2 - 2 \cos(\beta) \sin(\alpha) l_3 \omega_g \omega_i + \cos(\beta) \cos(\alpha) l_3 \omega_i^2) \end{bmatrix}$$

#### 3.2 Vraag 2

##### 3.2.1 ogenblikkelijke impulsmomentvector landingsgesel rond massacentrum

#### 3.3 Vraag 3

#### 3.4 Vraag 4

#### 3.5 Vraag 5